DOI：10.16285/j.rsm.2023.0262

单向冻结粉质黏土已冻区分凝冰分布规律试验研究

王 震[1]，朱珍德[2,3]，胡家豪[1]，周子玉[1]

（1. 汕头大学 土木与环境工程系，广东 汕头 515063；2. 河海大学 岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室，江苏 南京 210098；
3. 河海大学 江苏省岩土工程技术工程研究所，江苏 南京 210098）

摘 要：在单向冻结中，已冻区分凝冰的产生和发展是影响冻融土结构性特征的重要因素。选取降温速率（0.5～0.005 ℃/s）、冷端温度（–30～–70 ℃）、暖端补水（无补水、恒压补水）等 3 种单向冻结边界条件，探究其对已冻区分凝冰发育的影响规律。基于光学显微数字拍摄，自主研发了裂纹显微测量系统，为分凝冰裂纹的原位、无接触式测量提供了便利。试验研究发现：（1）不仅是温度梯度、暖端补水条件，单向冻结冷端降温速率对已冻区分凝冰分布也会产生影响，传统模型（如分凝模型）计算的水分迁移量难以准确反映已冻区冰裂纹分布特征；（2）冻结锋面移动速率对已冻区分凝冰宽度的影响大于温度梯度；（3）冻结过程中已冻区分凝冰宽度随 0 ℃线移动速率呈指数形式变化。最后基于 0 ℃线移动速率提出了已冻区分凝冰宽度预测的经验公式，为工程中评估变降温速率条件下黏土的单向冻胀破坏提供了参考。

关 键 词：单向冻胀；降温速率；黏土；分凝冰裂纹；超低温

中图分类号：TU 445 **文献标识码：**A **文章编号：**1000－7598 (2024) 02－407－11

Experimental study on segregating ice cracks distribution characteristics in unidirectional frozen silty clay

WANG Zhen[1], ZHU Zhen-de[2,3], HU Jia-hao[1], ZHOU Zi-yu[1]

(1. Department of Civil and Environmental Engineering, Shantou University, Shantou, Guangdong 515063, China;
2. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China;
3. Jiangsu Research Center for Geotechnical Engineering Technology, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China)

Abstract: In the process of unidirectional freezing, the generation and development of segregating ice is an important factor affecting the structural characteristics of frozen and thawed soil. Three unidirectional freezing boundary conditions were selected, i.e., cooling rate (from 0.5 ℃/s to 0.005 ℃/s), cold temperature (from –30 ℃ to –70 ℃), and water replenishment (no water replenishment, constant pressure water replenishment) to explore their influence on the development of segregating ice. To facilitate the measurement of segregating ice, an independent meso-measurement system has been developed using optical microscope digital photography. This system enables in-situ and non-contact measurement of segregating ice cracks. The experimental results demonstrate the following findings: (i) The distribution of segregating ice is not only influenced by temperature gradients and warm end replenishment conditions, but also by the cooling rate at the cold end of the unidirectional freezing process. (ii) The width of the segregating ice in the frozen area is more significantly affected by the movement rate of the frozen front than by the temperature gradient. (iii) During the freezing process, the width of the frozen ice exhibits an exponential relationship with the movement rate of the 0 ℃ line. Based on this characteristic, an empirical formula is proposed to predict the crack width of segregating ice in the frozen zone. This formula can be used as a reference for evaluating unilateral frost heave failure in practical engineering construction, particularly under conditions of varying cooling rates.

Keywords: unilateral frost heaving; cooling rate; clay; segregating ice cracks; ultra low temperature

1 引 言

在岩土单向冻结工程中，会遇到超低温工况。例如，在液氮作为冷媒的人工冻结隧道开挖工程中，单向冻结的冷端温度常处于超低温状态。此外，在岩土工程的冻结灾害中，还会遇到变冷端降温速率条件，例如在液化天然气（liquefied natural gas，简称 LNG）储罐泄露工况中，如图 1 所示，下沉式 LNG

收稿日期：2023-03-02 录用日期：2023-08-10
基金项目：国家自然科学基金（No. 41831278）；汕头大学科研启动基金（No. NTF21015）。
This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (41831278) and the Start-up Fund for Scientific Research of Shantou University (NTF21015).
第一作者简介：王震，男，1988 年生，博士，讲师，主要从事岩土冻融方面的研究。E-mail：wzhen@stu.edu.cn

储罐的基坑岩土将遭受超低温单向冻结破坏。当 LNG 泄露的规模和救治的手段不同时，作为超低温单向冻结的冷端温度变化也不同。在无有效救治措施的情况下，LNG 大规模泄露将导致变冷端降温速率的超低温单向冻结，其冻结边界条件与寒区自然冻结的缓慢降温有重大区别。拓展传统冻结边界条件研究范围，深入探究变冷端降温速率条件下土体超低温单向冻结破坏特征，对于提升人工冻结施工工艺有积极意义，同时也是应对岩土工程低温灾害的切实需要。

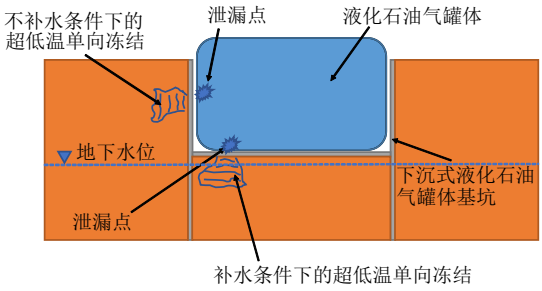


图 1 液化天然气（LNG）储罐泄露工况中基坑土体单向冻结破坏特征

Fig.1 Unidirectional freezing failure characteristics of foundation pit soil under leakage conditions of liquefied natural gas (LNG) storage tanks

在单向冻结中，受水分迁移作用，已冻区内沿着温度梯度方向将萌生和发展出分凝冰。分凝冰直接影响单向冻融土的结构性特征，是土体力学性质改变的重要细观尺度变量。传统的宏观尺度变量，例如水分迁移量或土的膨胀量，难以完整描述单向冻胀下土体结构的复杂变化。基于细观尺度深入探究已冻区分凝冰分布规律，对于充分揭示单向冻结条件下原状土力学性质的演化机制有着重要意义。

目前针对正冻土和融土的宏、细观结构特性改变，已报道众多极有意义的研究成果，如基于压汞试验[1]、电镜扫描试验[2]和光学显微观察试验[3]等获得的土的细观特征，以及基于分形分析[4]、含水率测试[5]获得的物理性质演化。但目前基于原位观测，从已冻区分凝冰分布的角度出发相关研究却较少。尽管已有分凝冰模型尝试描述冰透镜体带状序列特征，例如 Gilpin[6]、Chernov[7]等分凝模型，但模型基于冰–液体界面与理论化理想单个粒子的相互作用，对实际工程中的复杂冻结边界条件的适用性较差。然而在实际岩土工程中，真实环境变量中不仅仅是土颗粒的表面性质，还包括冷端降温速率、超低温等复杂冻结边界条件。近期许多学者开始增加对冷端降温模式、降温速率以及超低温冻融的关注，例如汪恩良[8]、于琳琳[9]、Zhao[10]、Wang[11]等探讨了连续降温、阶梯降温、正弦变化等不同降温模式对水分迁移量的影响。周家作等[12]研究了冻结速率对冻胀量的影响。Ming 等[13]建立了一个考虑降温速率的水分迁移量计算模型。王志良等[14]开展了人工冻结泥炭土的试验，研究发现，在试验初期的前 5 h 左右，土体温度下降速度较快，且距离冷源越近，温度下降速率越快。Tang 等[15]应用扫描电子显微镜（scanning electron microscope，简称 SEM）析了冻融后上海泥质黏土，发现孔隙的形状和取向没有显著变化，但孔隙体积随温度的降低而增大。尽管目前在变降温速率、变降温模式以及超低温冻融的研究中已产出大量成果，但仍主要针对正冻土水分迁移量和冻结膨胀量等宏观冻胀特征，与分凝冰发育相关的细、微观特征研究较少。

综上所述，目前关于超低温、变降温速率条件下单向冻结黏土分凝冰裂纹分布规律的研究较少。本文利用自主研发的超低温多级制冷系统，通过改变冻结温度、降温速率和补水强度等边界条件，在实验室模拟人工冻结产生的超低温、变降温速率单向冻胀环境。通过显微测量系统，探究温度场对单向冻结黏土分凝冰裂纹分布的影响规律，从已冻区分凝冰发育角度揭示单向冻胀融土强度衰减的内在机制，为人工冻土力学分析提供参考。

2 试验设备

2.1 超低温多级制冷系统

传统实验室超低温冻结主要依靠液氮实现，然而液氮虽然可以实现超低温，但是降温速率却难以控制。为了实验室模拟超低温的降温速率可变性，利用半导体制冷片和压缩机联合工作，自主研发了单向冻胀系统，实现电控制的变降温速率超低温多级制冷，工作原理如图 2 所示。设备采用半导体制冷片为试样提供冷端低温环境。半导体制冷片可以通过珀尔帖效应实现制冷，但需要给热端予以输入性冷源或散热处理。设备采用 3 种形式输入性冷源：常温冷源、一级压缩机制冷冷源、二级叠加制冷冷源（压缩机和半导体制冷联合冷源）。通过调节输入冷源的类型和流速，以及改变半导体制冷片电流，可以实现电控制变速率降温。

设备实物图如图 3 所示，可以实现 20～–80 ℃范围内温度的连续调节，控温精度为±0.1 ℃，最高降温速率为–1 ℃/s，如图 4 所示。可以实现多种形式降温曲线，如图 5 所示。相比液氮超低温制冷，速率调节简单且精确。试样尺寸为 ϕ 39.5 mm×80 mm 圆柱形试样，试样垂直放置于试样间，半导体制冷

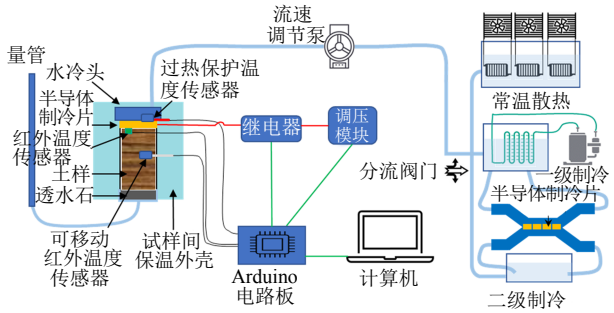


图 2　超低温多级制冷系统原理图

Fig.2　Schematic diagram of ultra-low temperature multi-stage refrigeration system

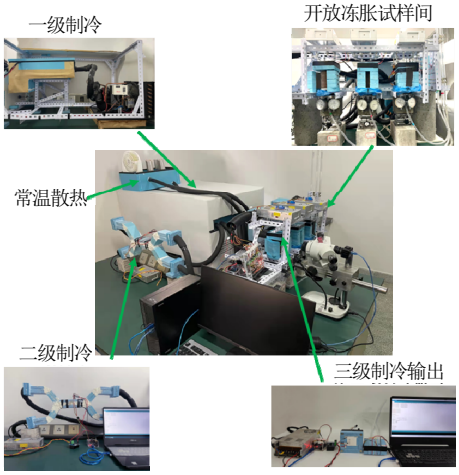


图 3　超低温多级制冷系统实物图

Fig.3　Ultra-low temperature multi-stage refrigeration system

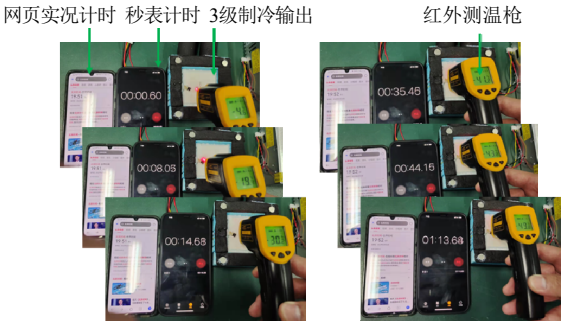


图 4　实际高速率降温效果图

Fig.4　Actual high-speed cooling

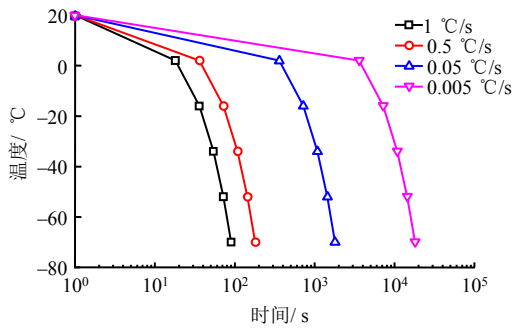


图 5　多种形式降温曲线

Fig.5　Various cooling curves

片放置于试样顶部，底部为透水石，透水石放置于器皿中，器皿与量管相连，通过调整量管液面可以微调补水压力。试样间上下形成温度差，侧壁由挤塑板保温。试样间为开合式，并设有观察窗口，试验中途观察窗口处保温棉可拆卸。红外传感器可以通过观察窗口测量试样温度。热电偶温度传感器无法快速响应，因此采用红外温度传感器作为温度扫描用传感器。红外温度传感器型号为 MLX90614ESF-BAA，品牌为 MELEXIS（出厂已校核）。制冷片型号为 TEC1-12706A，品牌为 Tougsley。

2.2　显微摄像裂纹识别系统

由于冰裂纹发生位置的随机性，传统变形测量手段，例如应变片、引伸计等难以有效测量裂纹宽度，同时接触式测量手段会对冰裂纹生长产生干扰。另外超低温状态下的正冻土电镜扫描在扫描前对试样的预处理对冰裂纹的形态产生干扰。压汞试验需要利用融土进行，然而融土受自重作用，冰裂纹的形态也会受到干扰。CT 技术需要利用未冻水对 CT 进行校准，但正冻土未冻水含量较少，因此 CT 技术在正冻土中的测量精度较差。本文基于显微摄像技术开发了一种非接触式的细观变形测量系统，如图 6 所示。基本原理是在固定放大倍率条件下，显微摄像的像素点与被拍摄物体的实际物理尺寸有对应关系。因此，对于裂纹或夹杂来说，可由像素数量换算出其实际物理尺寸，然后应用 Matlab 编制图像处理程序，可以在手动描绘裂纹边缘的情况下，获得面积和沿指定方向的裂纹宽度。由于水分迁移过程比较缓慢对摄像速度要求不高，因此可采用普通低速数码摄像器材对显微图像进行拍摄。显微摄像不像 SEM 需要对正冻土进行预处理，因此对冰裂纹的干扰更少。同时显微摄像可以在正冻土冻结过

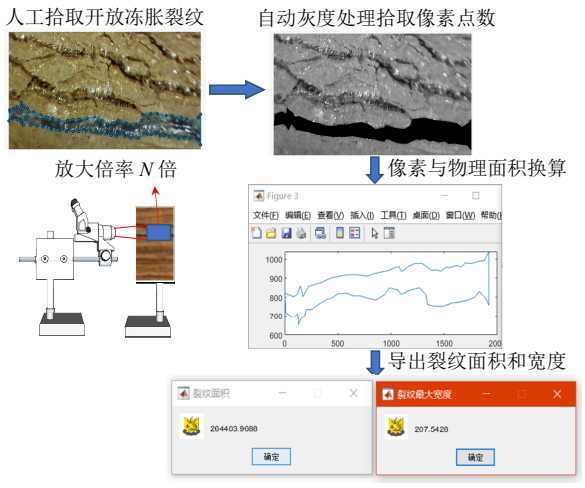
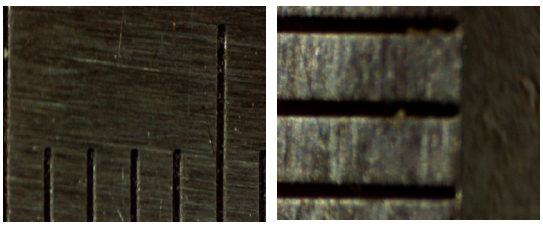


图 6　显微摄像裂纹识别系统

Fig.6　Crack recognition system by microscopic camera

程中进行原位观测，无需将试样从试样间取出，更不需要像压汞试验利用融土进行。

为实现像素尺寸的矫正，分别将标准的钢尺沿拍摄图像的竖直和水平放置，调整放大倍率进行拍照，如图 7 所示。电子相机像素设置为 1 600 像素×1 200 像素，应用 Matlab 编制图像处理程序可以获得钢尺刻度间像素数量，用刻度尺寸除以像素数量，可得单位像素尺寸。在各放大倍率和相机像素控制条件下，典型像素尺寸如表 1 所示。



(a) 水平放置 (b) 竖直放置

图 7 水平和竖直放置的钢尺显微拍摄图

Fig.7 Micrograph with ruler placed horizontally, vertically

表 1 像素尺寸表

Table 1 Dimensions of pixels

放大倍数			实际X值	实际Y值	对应像素	单位像素尺寸
目镜	物镜	物像	/ mm	/ mm	/(像素×像素)	/(mm×mm)
10	1.0	10	10.0	5.5	1 600×1 200	0.006 250×0.004 580
10	1.5	15	6.0	3.5	1 600×1 200	0.003 750×0.002 920
10	2.0	20	5.0	2.5	1 600×1 200	0.003 130×0.002 080
10	3.0	30	3.0	2.0	1 600×1 200	0.001 875×0.001 67
10	4.0	40	2.5	1.5	1 600×1 200	0.001 570×0.001 250
10	4.5	45	2.0	1.0	1 600×1 200	0.001 250×0.000 830

3 试验方案

人工冻结技术通常在地下富水层中采用，因此试样土体采用较高饱和度（84.08%）。未采用饱和土是因为饱和土强度过低，在脱模后放入冻结试样间时自重变形过大，影响冰裂纹的发育。为了排除颗粒夹杂对土体冰裂纹生长的影响，采用质地均匀的粉质黏土。设定可变的单侧冻结边界条件分别为冷端温度、冷端降温速率、暖端补水条件。冷端温度共设置 3 个温度分别为–30、–50、–70 ℃。LNG 泄露时低温液体快速相变形成的蒸气云，下沉式混凝土储罐与基坑之间存在间隙，因此与基坑岩土直接接触为 LNG 蒸气，而非液态 LNG。LNG 蒸气的最低温度为–110 ℃，同时考虑到基坑存在混凝土护壁，因此基坑岩土的冻结温度将高于–110 ℃。目前试验设备可以在–70～–80 ℃温度范围内连续稳定运行，温度低于–80 ℃时连续运行的稳定性降低，且难以使用红外测温装置实现非接触快速测温。因此受限于试验设备，将试验的最低温度设定为–70 ℃。

暖端补水压力通过调整量管液面高度实现，但为使得试验结果对比性增强，采用极端补水条件：不补水和恒压补水（控制补水量管液面恒定且与试样底部齐平）；降温速率通过调节输入冷源的类型和流速，以及计算机设定程序改变半导体制冷片电流实现 2 种速率分别为 0.5 ℃/s（快速）和 0.005 ℃/s（慢速）。根据冻结边界条件的不同组合，试验共分为 12 组，每组 3 个试样，共 36 个试样。预试验结果显示，6～8 h 内已冻区范围基本稳定，但为了减少测量时间对冻结锋面裂纹宽度带来的影响，将最终测量时间延长 10 h，统一设定为 18 h。

4 试验步骤

4.1 试样制备

粉质黏土经烘干捣碎后过 0.25 mm 筛，级配如图 8 所示。试样制备时首先将黏土加入水（土水质量比为 4:1）后搅拌充分，将拌置好的土样用保鲜膜密封 24 h，以确保土体内水均匀分布。之后每个试样取 220 g 土样放入 ϕ39.5 mm×100 mm 模具中，分 3 层填充击实，控制击实高度。截取击实后试样，最终制成 ϕ39.5 mm×80 mm 的圆柱试样。测得试样密度为 1.75 g/cm^3，液限为 43%，塑限为 20%，饱和度为 84.08%。采用小尺寸试样的主要原因是–70 ℃时大尺寸试样难以保证温度场均匀性，小尺寸试样可以较好地解决上述问题。试样黏土采用最大粒径 0.25 mm 远远小于试样尺寸 39.5 mm，因此从土颗粒粒径角度来看小尺寸试样是可行的。

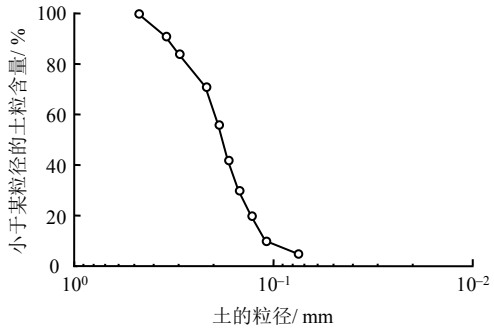


图 8 土样级配曲线

Fig.8 Grading curve of soil sample

4.2 设置冷端目标温度、补水条件、降温速率

将制备好的试样垂直放置于试样间内，设置所需冷端目标温度、暖端补水条件、降温速率后开始单向冻结试验。其中，降温速率通过调节输入冷源的类型和流速，以及在计算机设定程序，通过 Arduino

控制调压电路模块，改变半导体制冷片电压随时间改变的频率，同时半导体制冷片设有红外温度传感器，为电压修正提供数据。通过调整量管液面与试样底部透水石顶面高度相同，来实现暖端恒压补水。在计算机设定程序，基于半导体制冷片的红外温度传感器提供数据，通过 Arduino 控制调压电路模块设定半导体制冷片最大电流，进而实现–30、–50、–70 ℃的冷端目标温度调节。

4.3　0 ℃线移动速率测定

在开放冻结试验过程中，短暂打开试样间观察窗口，利用红外温度传感器通体扫描试样，可以确定 0 ℃线所在位置，如图 9 所示，红点标注处为测得的当前时刻 0 ℃线所在位置。通过测量两次时间间隔下 0 ℃线前进距离（即相邻两个标注红点的间距）可以换算出试样 0 ℃线在两次时间间隔下（即相邻标注点间）的平均移动速率。



(a) 初始未冻结状态　(b) 1 h 时 0 ℃线位置　(c) 2 h时0 ℃线位置　(d) 3 h 时 0 ℃线位置

图 9　相同时间间隔下 0 ℃线所在位置标注

Fig.9　Labeling of the location of the 0 ℃ line at the same time interval

4.4　单向冻胀裂纹特征

利用显微摄像裂纹识别系统对试样的冻结裂纹进行观测，得到不同冻结边界条件下试样的已冻区、冻结锋面裂纹的宽度特征，如图 10 所示。

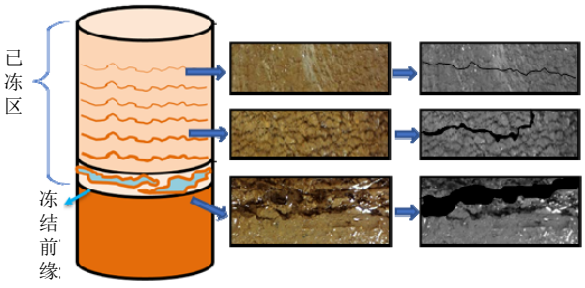


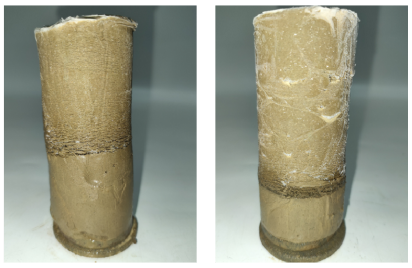
图 10　显微摄像裂纹识别系统测量裂纹特征

Fig.10　Measurement of crack by crack recognition system

5　试验结果

5.1　已冻区高度

试样的已冻区高度会随着冻结边界条件的改变而改变，如图 11 所示，在恒压补水、降温速率为 0.5 ℃/s 条件下，冷端温度为–30、–50 ℃时已冻区高度明显不同。表 2 给出了 12 种温度边界条件组合的已冻区高度值。已冻区范围会随着温度梯度的增加而增加，但降温速度和补水条件对已冻区范围均有影响。降温速度增加、补水压力增大均有利于已冻区范围的增大。



(a) 冷端温度为–30 ℃　(b) 冷端温度为–50 ℃

图 11　恒压补水、降温速率为 0.5 ℃/s 条件下试样的已冻区高度

Fig.11　Scope of frozen area of samples with constant pressure water replenishment and a cooling rate of 0.5 ℃/s

表 2　已冻区高度

Table 2　Scope of frozen area

已冻区高度/ cm	降温速度/ (℃ · s^{-1})	温度边界条件
4.93	0.005	–30 ℃慢速补水
5.96	0.500	–30 ℃快速补水
4.86	0.005	–30 ℃慢速不补水
5.78	0.500	–30 ℃快速不补水
6.18	0.005	–50 ℃慢速补水
6.51	0.500	–50 ℃快速补水
5.89	0.005	–50 ℃慢速不补水
6.87	0.500	–50 ℃快速不补水
7.32	0.005	–70 ℃慢速补水
7.91	0.500	–70 ℃快速补水
7.26	0.005	–70 ℃慢速不补水
7.85	0.500	–70 ℃快速不补水

5.2　已冻区分凝冰宽度

图 12 给出了 12 种温度边界条件组合下，已冻区分凝冰宽度随着冻结深度变化而改变的结果。已冻区分凝冰的宽度随着冻结深度的增加而增加，但

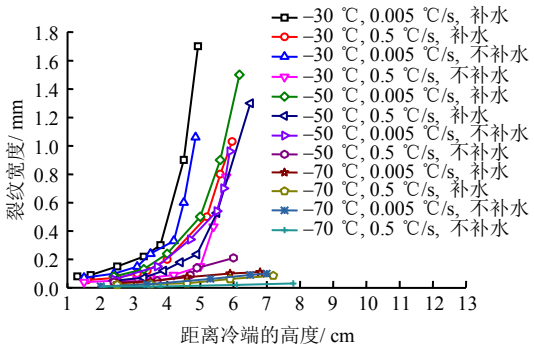


图 12　已冻区分凝冰宽度随冻结深度的变化

Fig.12　Variation of segregating ice width with freezing depth

裂纹宽度的变化并非随深度线性变化，而是在冷端裂纹宽度较小，在冻结锋面处裂纹宽度会快速增加。裂纹宽度并不随着冷端温度的降低而增大，而是相反，冷端温度越低，已冻区分凝冰越小（在接近冷端处）。

5.3 0 ℃线移动速率

图 13 给出了 12 种温度边界条件组合下，0 ℃线移动速率随着冻结深度变化而改变的结果。单独列出 0 ℃线移动速率的原因是：试验结果显示 0 ℃线移动速率与已冻区分凝冰宽度的变化存在较强的相关性（在第 6 节的讨论中将详细介绍）。由图 13 可以看出，0 ℃线移动速率在冷端附近移动速度较快，随着冻结深度的加深，移动速率逐渐降低。

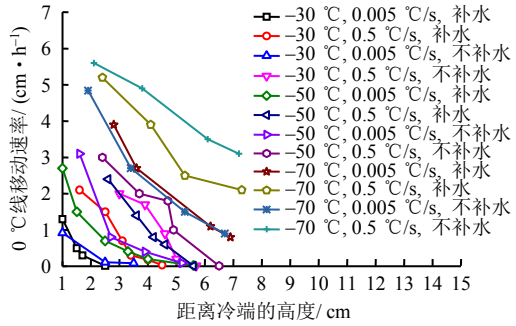


图 13 0 ℃线移动速率随冻结深度的变化

Fig.13 Variation of movement rate of 0 ℃ line with freezing depth

6 讨 论

6.1 水分迁移量在冻胀裂纹预测中的不准确性

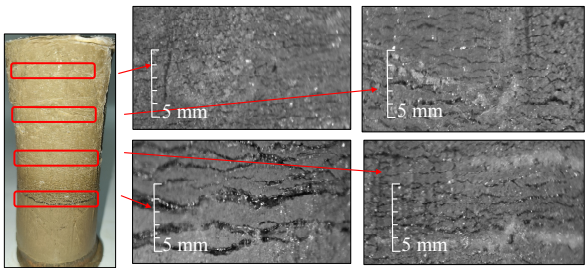
在传统单向冻胀研究中，未冻水的水分迁移量与冻胀的隆起发育程度直接相关，因此水分迁移量一直是单向冻胀研究的重点。在相同补水条件及温度梯度下，依据传统水分迁移理论如 Konrad 分凝模型，水分迁移量是相同的。如果应用水分迁移量预测冻胀裂纹发育，那么在相同补水条件及温度梯度下冻胀裂纹的发育应该是相同的。然而试验结果显示冻胀裂纹明显不同，如对比试验 1 所示。

6.1.1 对比试验 1

对比试验 1 的试验条件有两种：试验 A，冷端温度为–30 ℃，降温速率为 0.5 ℃/s，恒压补水；试验 B，冷端温度为–30 ℃，降温速率为 0.005 ℃/s，恒压补水。

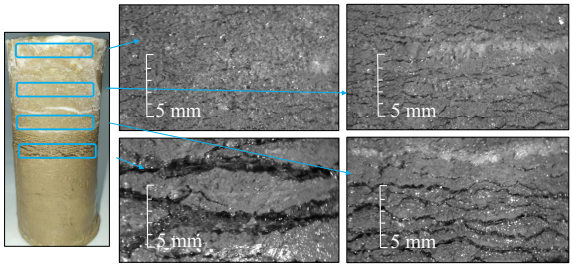
对比试验 1 的试验结果如图 14 所示，冻胀裂纹呈现明显不同的分布特征。在慢速降温条件下（降温速率为 0.005 ℃/s），已冻区范围较小，但已冻区分凝冰发育更为丰富。然而在快速降温条件下（降温速率为 0.5 ℃/s），已冻区范围较大，但已冻区分凝冰发育较弱，宽度较小。

上述现象不仅在–30 ℃条件下存在，在–50、–70 ℃时同样展现相似规律，如图 15 所示。快速冻胀下冻结锋面移动距离更长，但慢速冻胀已冻区分凝冰更丰富。因此仅凭借水分迁移量（或者温度梯度和补水条件）预测冻胀裂纹发育并不理想。



最大裂纹宽度为 1.03 mm

(a) –30 ℃，0.5 ℃/s，恒压补水



最大裂纹宽度为 1.77 mm

(b) –30 ℃，0.005 ℃/s，恒压补水

图 14 对比试验 1 的宏观冻胀裂纹特征

Fig.14 Macroscopic frost heave failure characteristics of contrast test 1



(a) –50 ℃，慢速降温　(b) –50 ℃，快速降温　(c) –70 ℃，慢速降温　(d) –70 ℃，快速降温

图 15 –50 ℃和–70 ℃时宏观冻胀裂纹特征

Fig.15 Macroscopic frost heave failure characteristics at –50 ℃ and –70 ℃

在对比试验 1 中，已冻区分凝冰分布特征的不同是由冷端降温速率引起的。因此是否可以应用冷端降温速率预测冻胀裂纹发育呢？然而试验结果显示冷端降温速率也无法单独影响已冻区分凝冰发育，如对比试验 2 所示。

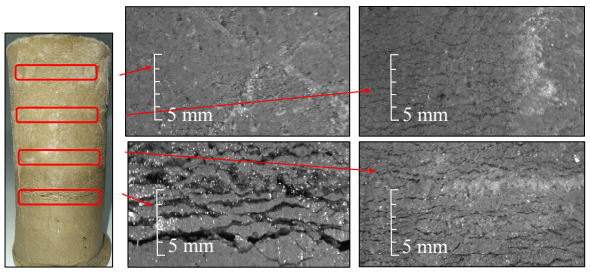
6.1.2 对比试验 2

对比试验 2 的试验条件有两种：试验 A，冷端

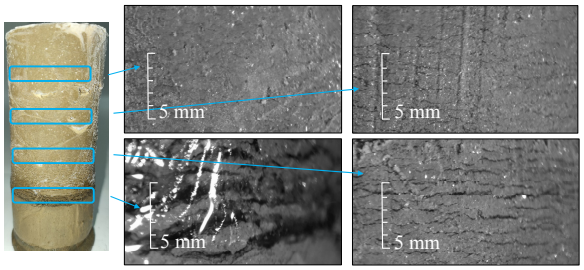
温度为–30 ℃，降温速率为 0.5 ℃/s，不补水；试验 B，冷端温度为–50 ℃，降温速率为 0.5 ℃/s，恒压补水。

对比试验的试验结果如图 16 所示，冰裂纹呈现完全不同的分布特征。在两种冻胀边界条件下，冻结锋面停留位置分别为 5.78、6.51 cm，已冻区分凝冰的最大宽度分别为 0.84、1.38 mm。

如果冷端降温速率可以单独影响已冻区分凝冰发育，那么上述两组试验中的裂纹发育应该相同，但试验结果却明显不同。因此，冷端降温速率也无法单独影响已冻区分凝冰发育。



最大裂纹宽度为 0.84 mm
(a) –30 ℃, 0.5 ℃/s，不补水



最大裂纹宽度为 1.38 mm
(b) –50 ℃, 0.5 ℃/s，恒压补水

图 16　对比试验 2 的宏观冻胀裂纹特征
Fig.16　Macroscopic frost heave failure characteristics of contrast test 2

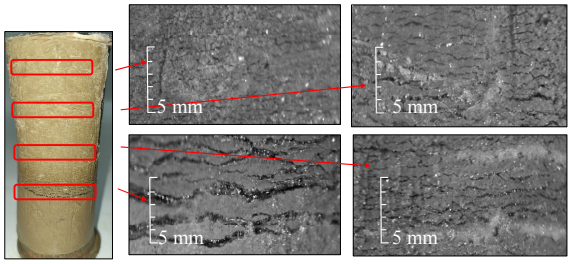
总结对比试验 1、2 可知，水分迁移量和冷端降温速率均无法单独决定已冻区分凝冰分布特征。为了进一步探讨冻胀边界条件与已冻区分凝冰分布的关系，在此给出对比试验 3。

6.1.3　对比试验 3

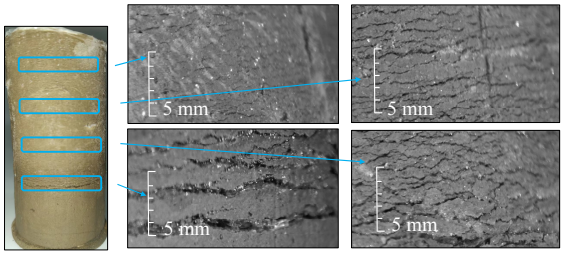
对比试验 3 的试验条件有两种：试验 A，冷端温度为–30 ℃，降温速率为 0.5 ℃/s，恒压补水；试验 B，冷端温度为–50 ℃，降温速率为 0.005 ℃/s，不补水。

对比试验的试验结果如图 17 所示，冰裂纹呈现极为相似的分布特征。冻结锋面停留位置分别为 5.96、5.89 cm，已冻区分凝冰的最大宽度分别为 1.03、0.96 mm。

在对比试验 3 中，无论是冷端温度、降温速率还是补水情况，任意冻结边界条件均不相同，但是已冻区分凝冰分布特征相似。因此已冻区分凝冰分布特征是由冷端温度、降温速率和补水情况协同作用的结果。而探究冻胀边界条件协同作用的机制以及具体形式是描述已冻区分凝冰分布特征的关键。



最大裂纹宽度为 1.03 mm
(a) –30 ℃, 0.5 ℃/s，恒压补水



最大裂纹宽度为 0.96 mm
(b) –50 ℃, 0.005 ℃/s，不补水

图 17　对比试验 3 的宏观冻胀裂纹特征
Fig.17　Macroscopic frost heave failure characteristics of contrast test 3

6.2　0 ℃线移动概念的提出

由于实际试验操作中 0 ℃线与冻结锋面相关，但相比冻结锋面更容易快速获得。0 ℃线只需要温度传感器扫描即可获得，而冻结锋面需要进行显微观测。原位测量需要短暂打开试样间，显微观测通常需要较长时间，容易影响试样的温度场。因此，本文提出 0 ℃线移动的概念，并尝试探究其运动特征与单向冻胀裂纹发育特征的关系。

整理对比试验 3 中 0 ℃线移动速率，如图 18 所示。虽然两组试验的冻胀边界条件完全不同，但 0 ℃线移动速率却极为相似。而对比试验 3 中分凝冰的分布同样极为相似。因此假设 0 ℃线移动速率与已冻区分凝冰生成机制相关。

若此相关性真实存在而非偶然结果，则在已冻区分凝冰特征不同的对比试验，例如对比试验 1 中，其 0 ℃线移动速率也将不相同。试验结果显示，对比试验 1 中 0 ℃线移动速率确实存在不同，如图 19 所示。

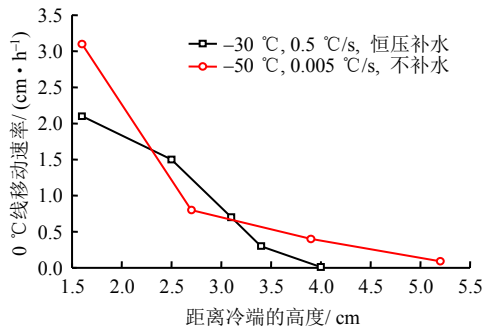


图 18 对比试验 3 的 0 ℃线移动速率曲线对比
Fig.18 Comparison of 0 ℃ line decline rate curves of contrast test 3

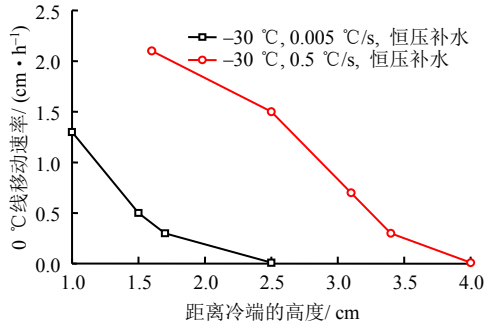


图 19 对比试验 1 的 0 ℃线移动速率曲线对比
Fig.19 Comparison of 0 ℃ line decline rate curves of contrast test 1

通过以上两组对比试验发现，0 ℃线移动速率相同，已冻区分凝冰构造相似；0 ℃线移动速率不同，已冻区分凝冰构造差别较大。上述试验结果与界面预熔融分凝模型的物理机制存在一致性。在基于冰-液体界面与单个粒子的相互作用的界面预熔融分凝模型中，当冻结锋面接近土颗粒时，悬浮在靠近前沿的预熔融体中，它可以排斥颗粒，将土颗粒推到冰的前面（形成冰透镜），或者它可以吞没颗粒，将其捕获在生长的固体区域内（形成冰透镜间的冻土）。在模型中这种相互作用的结果取决于冻结锋面的速度（也称冻结速率，文中 0 ℃线的移动速度概念与冻结锋面的速度相接近）、颗粒尺寸和颗粒-预熔融体-冰的各种物理特性。

6.3 0 ℃线移动速率与已冻区分凝冰宽度的相关性

本节通过对比试验，探究各类冻胀边界引起的 0 ℃线移动速率改变，并验证 0 ℃线移动速率与已冻区分凝冰宽度的相关性。

6.3.1 温度梯度改变

温度梯度的改变会导致 0 ℃线移动速率的改变，因此给出对比试验 4，以探究温度梯度作用下 0 ℃线移动速率与已冻区分凝冰宽度的相关性。对比试验 4 的试验条件为降温速率为 0.5 ℃/s，不补水，冷端目标温度分别为–30、–50、–70 ℃。

对比试验 4 的试验结果如图 20 所示。由图可知，温度梯度的改变会导致 0 ℃线移动速率的改变；且随着温度梯度的增加，0 ℃线移动速度在增加。

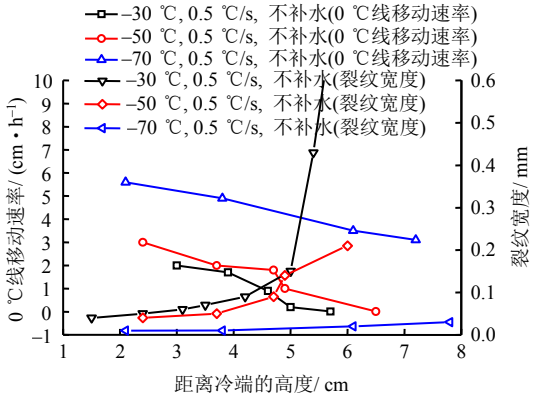


图 20 对比试验 4 的 0 ℃线移动速率曲线对比
Fig.20 Comparison of 0 ℃ line decline rate curves of contrast test 4

当冷端温度为–30、–50、–70 ℃时，在已冻区内的任意高度处的裂纹宽度均随着 0 ℃线移动速度的增加而减小，进一步验证了 0 ℃线移动速率与已冻区分凝冰宽度存在相关性。

6.3.2 降温速率改变

降温速率的改变会导致 0 ℃线移动速率的改变，因此给出对比试验 5，以探究降温速率作用下 0 ℃线移动速率与已冻区分凝冰宽度的相关性。对比试验 5 的试验条件为冷端温度为–30 ℃，补水，冷端降温速率分别为 0.5、0.005 ℃/s。

对比试验 5 的试验结果如图 21 所示。由图可知，降温速率的改变会导致 0 ℃线移动速率的改变，且随着降温速率的增加，0 ℃线移动速度在增加。

当降温速率为–0.5、0.005 ℃/s 时，在已冻区内的任意高度处的裂纹宽度均随着 0 ℃线移动速度的

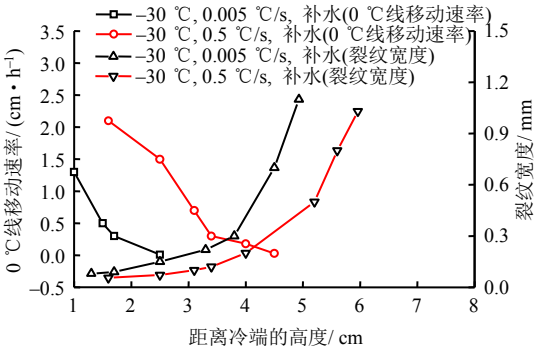


图 21 对比试验 5 的 0 ℃线移动速率曲线对比
Fig.21 Comparison of 0 ℃ line decline rate curves of contrast test 5

增加而减小，同对比试验 4 一致，又进一步验证了 0 ℃线移动速率与已冻区分凝冰宽度存在相关性。

同时无论是冷端降温速率是 0.5 ℃/s，还是 0.005 ℃/s，均呈现 0 ℃线移动速度越快，相应已冻区分凝冰宽度越小的规律。

6.3.3 补水条件改变

补水条件的改变会导致 0 ℃线移动速率的改变，因此给出对比试验 6，以探究补水条件作用下 0 ℃线移动速率与已冻区分凝冰宽度的相关性。对比试验 6 的试验条件为冷端温度为–50 ℃，冷端降温速率为 0.5 ℃/s，有补水以及无补水。对比试验 6 的试验结果如图 22 所示。由图可知，补水条件的改变会导致 0 ℃线移动速率的改变，且随着补水强度的增加，0 ℃线移动速度在降低。

对比有无补水两个试验条件，在已冻区内的任意高度处的裂纹宽度均随着 0 ℃线移动速度的增加而减小，同对比试验 4、5 均一致，再进一步验证了 0 ℃线移动速率与已冻区分凝冰宽度存在相关性。

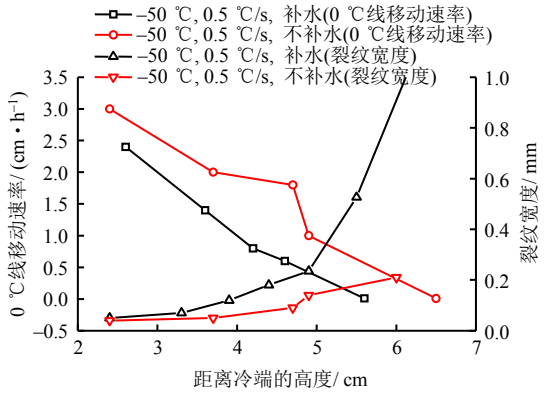


图 22　对比试验 6 的 0 ℃线移动速率曲线对比

Fig.22　Comparison of 0 ℃ line decline rate curves of contrast test 6

0 ℃线移动速率与已冻区分凝冰发育宽度存在相关性，且不受 0 ℃线移动速率改变产生原因的影响。0 ℃线移动速率的改变无论产生于补水条件、温度梯度还是降温速率，相关性均存在，呈现 0 ℃线移动速率越慢，对应的已冻区分凝冰宽度越大的规律。

7　已冻区域裂纹宽度经验公式

7.1　已冻区域裂纹宽度与 0 ℃线移动速率的关系

根据上述试验结果可知，0 ℃线移动速率与已冻区分凝冰发育宽度存在相关性，且 0 ℃线移动速率越慢裂纹宽度越大。为了定量描述 0 ℃线移动速率与已冻区分凝冰发育宽度的相关性，利用 Origin 软件对–50 ℃，快速降温（0.5 ℃/s），补水这一组试验数据进行分析，得到已冻区域裂纹宽度与 0 ℃线移动速率的拟合函数：

$$W = a\mathrm{e}^{-bv} \tag{1}$$

式中：W 为已冻区某一位置裂纹宽度；v 为 0 ℃线经过该位置时的移动速率；a、b 为与土质相关的冻结参数，$a=0.32$、$b=0.85$。拟合曲线如图 23 所示。

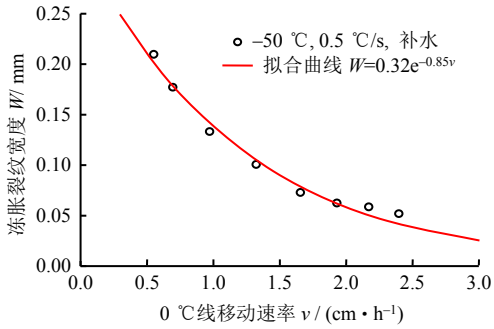


图 23　–50 ℃，0.5 ℃/s，补水时裂纹的已冻区分凝冰宽度拟合曲线

Fig.23　Fitting curve of crack width in frozen zone at 30 ℃, 0.5 ℃/s with water supplement

7.2　已冻区域裂纹宽度经验公式的验证

为了验证裂纹宽度经验式（1）对不同冻结边界条件下的适用程度，分别对–30 ℃，0.5 ℃/s，不补水；–50 ℃，0.5 ℃/s，不补水；–70 ℃，0.005 ℃/s，补水的试验数据进行分析，结果如图 24 所示。在不同的温度梯度、降温速度、补水条件下，已冻区域裂纹宽度与 0 ℃线移动速率的关系都较好符合裂纹宽度经验公式（1）。

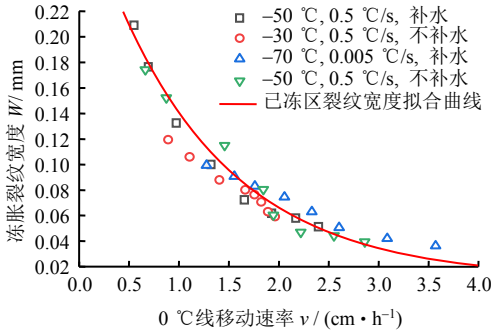


图 24　已冻区分凝冰裂纹宽度经验公式对不同边界条件下的适用情况

Fig.24　Application of empirical formulae for crack width in the frozen zone for different boundary conditions

在实际工程中，0 ℃线移动速率是一个较容易获得的物理量，可以通过在基坑、边坡、路基中预埋温度传感器实现。而已冻区域裂纹分布特征则需要进行现场取样，并在保持低温环境中进行细观测量，相应数据较难获得，且数据采集受外界环境干扰误差较大。通过已冻区域裂纹宽度经验公式，利用 0 ℃线移动速率，用间接测量的方式揭示已冻区域裂纹分布特征。这种方法在工程中成本低，且易操作。

8 结 论

在变降温速率开放冻胀试验和分凝冰发育机制研究方面，得到如下主要结论：

（1）不仅是温度梯度、暖端补水条件，单向冻结冷端降温速率对已冻区分凝冰分布也会产生影响。传统模型（如分凝模型）计算的水分迁移量难以准确反映已冻区冰裂纹分布特征。

（2）单向冻结过程中，0 ℃线移动速率是影响已冻区分凝冰分布的关键因素。对于粉质黏土，已冻区分凝冰宽度随 0 ℃线移动速率呈指数形式变化。

（3）在工程应用方面，通过在岩土体中预埋温度传感器，以监测 0 ℃线移动速率变化。基于已冻区域分凝冰宽度经验公式，可以通过 0 ℃线移动速率预测已冻区域分凝冰宽度，而无需对岩土进行大规模破坏性钻探取样，以探究其冻胀破坏特征。

参 考 文 献

[1] 王升福, 杨平, 刘贯荣, 等. 人工冻融软黏土微观孔隙变化及分形特性分析 [J]. 岩土工程学报, 2016, 38(7): 1254-1261.
WANG Sheng-fu, YANG Ping, LIU Guan-rong, et al. Micro pore change and fractal characteristics of artificial freeze thaw soft clay[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2016, 38(7): 1254-1261.

[2] 丁智, 张孟雅, 魏新江, 等. 地铁冻结法工后融土微观结构试验研究[J]. 铁道工程学报, 2016, 33(11): 106-112.
DING Zhi, ZHANG Meng-ya, WEI Xin-jiang, et al. Experimental research on the microstructure of thawed soil after the sub-way construction of freezing method[J]. **Journal of Railway Engineering Society**, 2016, 33(11): 106-112.

[3] 雷华阳, 张文振, 霍海峰, 等. 水汽补给下砂土冻胀量与微观结构参数关联研究[J]. 岩土力学, 2022, 43(9): 2337-2346, 2359.
LEI Hua-yang, ZHANG Wen-zhen, HUO Hai-feng, et al. Correlation between frost heave and microscopic parameters of sand under water vapor recharge[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2022, 43(9): 2337-2346, 2359.

[4] 彭丽云, 刘建坤. 正融粉质黏土在循环荷载作用下的变形特性研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 32(4): 567-572.
PENG Li-yun, LIU Jian-kun. Deformation properties of thawing silty clay under cyclic loading[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2011, 32(4): 567-572.

[5] 崔宏环, 王文涛, 杨兴然, 等. 季节冻土区正融粉质黏土强度影响因素敏感性分析[J]. 冰川冻土, 2020, 42(3): 899-908.
CUI Hong-huan, WANG Wen-tao, YANG Xing-ran, et al. Sensitivity analysis of the influencing factors on strength of silty clay in seasonally frozen regions[J]. **Journal of Glaciology and Geocryology**, 2020, 42(3): 899-908.

[6] GILPIN R R. A model for the prediction of ice lensing and frost heave in soils[J]. **Water Resources Research**, 1980, 16(5): 918-930.

[7] CHERNOV A, TEMKIN D, MEL'NIKOVA A. Theory of the capture of solid inclusions during the growth of crystals from the melt[J]. **Soviet Physics Crystallography**, 1976, 21(4): 369-373.

[8] 汪恩良, 刘风波, 刘兴超, 等. 考虑温控模式对非饱和土冻结规律研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2018, 26(6): 1247-1258.
WANG En-liang, LIU Feng-bo, LIU Xing-chao, et al. Experimental study on frost heave and moisture transfer model of unsaturated soil with different temperature control[J]. **Journal of Basic Science and Engineering**, 2018, 26(6): 1247-1258.

[9] 于琳琳, 徐学燕. 人工侧向冻结条件下土的冻结试验[J]. 岩土力学, 2009, 30(1): 231-235.
YU Lin-lin, XU Xue-yan. Test analysis of disturbed soil by lateral artificial freezing[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(1): 231-235.

[10] ZHAO H X, ZHONG J, WANG Z J. Experimental study on the influence of different cooling rate to frost heave of silty clay[C]//Proceedings of the Advanced Materials Research. Switzerland: Trans Tech Publications, Ltd., 2014.

下转第 432 页